

炭化物,窒化物の析出を利用した,熱間圧延鋼板の延性および靱性の改善

著者	小林 洋
号	430
発行年	1978
URL	http://hdl.handle.net/10097/11379

氏 名	こ ばやし ひろし 小 林 洋
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 5 4 年 3 月 7 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 4 4 年 3 月 東北大学工学部金属工学科卒業

学 位 論 文 題 目 炭化物、窒化物の析出を利用した、熱間圧延鋼板の延性および靱性の改善

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 平野 賢一 東北大学教授 須藤 一
東北大学教授 辛島 誠一

論 文 内 容 要 旨

熱間圧延鋼板は工業の各分野において多量に使用されている重要な材料である。それゆえ、これらの鋼板の性能を向上させることは極めて重要な意味を持つ。過去においては普通炭素鋼が大半をしめてきたが、近年では鋼板の用途が著しく多様化し、軟鋼板から高張力鋼板に到るまで、多種類の鋼板が用いられるようになった。中でも、鋼構造物の軽量化あるいは使用量の削減という観点から、高張力鋼の重要が急増している。一方では成形加工性、耐寒性など鋼板に対する要求も益々苛酷になっている。すなわち、軟鋼板では特に成形加工性、高張力鋼板ではこれに加えて低温靱性といった材料特性の向上が強く望まれている。本論文はこのような現在および将来の工業上の必要性に対応して熱間圧延鋼板の成形加工性および靱性の向上を目的として行なった研究の成果をまとめたものである。

第 1 章 序 論

熱間圧延鋼板の延性および靱性に関する従来の研究とその問題点ならびに鋼板における炭、窒化物形成元素の重要性について述べ、本研究の目的と意義を記した。

第 2 章 Cr および Zr を添加した極低降伏点鋼板

集合組織の制御が不可能な熱間圧延鋼板においては成形加工性をよくするためには延性の向上

が極めて重要となる。軟鋼板の場合には、その用途から、降伏強度を低下させ、延性を増加させることが重要である。そのため、製造に際しては極力C, N, Si, P, SあるいはMnの量を低下せしめる努力がなされている。しかし、このことは溶鋼中の O_2 を増加させ、鋼の延性を著しく阻害する。本章では、製鋼技術の上で無理をきたさない化学組成を有する軟鋼に特殊な元素を添加することによって、降伏強度を低下させる試みとして、軟鋼の降伏強度におよぼす炭化物、窒化物形成元素であるCrおよびZrの影響を調べた結果を述べている。

- (1) 熱間圧延鋼板の降伏強度はCrを添加するとまず低下し、さらにCr量を増すと上昇する。
これはCrによる固溶効果と結晶粒微細化とが重なり合うためである。
- (2) Zrの添加は結晶粒の大きさに無関係に常に鋼の降伏強度を低下させるが、Crの添加は粗大な結晶粒の場合にのみ降伏強度を低下させる。
- (3) Hall-Petchプロットから求められる σ_0 はCr量とともに減少するが、Zrの添加によっては顕著な変化を示さない。
- (4) Hall-Petchプロットから求められる K_y はCr量とともに増加するが、Zrの添加によって減少する。これは粒界近傍のパーライト量の増減に対応している。
- (5) パーライトの量が著しく少なくなるようにZrおよびCrを組合せて添加することにより、 σ_0 と K_y を同時に減少させることが可能であり、降伏強度の極めて低い鋼を得ることができる。
本研究で開発した極軟鋼板の降伏強度の最低値は約 10 Kg/mm^2 であり、従来鋼にくらべ、より厳しい深絞り加工が可能であり、種々の実用上の利点をもっている。

第3章 成形加工用非歪時効性熱間圧延薄鋼板

一般の成形加工用軟鋼板の多くは連続式熱間圧延機で製造されている。かかる鋼板は製造後時間の経過とともに降伏強度が増加し、延性が低下するため成形加工性が著しく劣化するという問題がある。この現象は歪時効とよばれ、その原因は浸入型に固溶したNにある。これを防ぐため、Nとの親和力の強いAlを添加しているが、必ずしも、非歪時効性にはならない。そこで本研究においてはZr, Ti, Nb, V, B等のNとの親和力のより大きな元素の添加がアルミキルド熱間圧延鋼帯の歪時効におよぼす影響について調べ、以下のことを明らかにした。

- (1) 圧延のままの熱間圧延鋼帯ではAlが添加されていても、過飽和の固溶Nが残存し、歪時効硬化を起こす原因となる。しかし、この場合の歪時効硬化量はAlNの析出とともに減少し、析出の完了によって消失する。連続式熱間圧延機で製造する場合には 680°C 以上の温度で巻取ることによってAlNの析出を起こさせ、歪時効性を抑制することができる。しかし、鋼帯周辺部ではそれを抑制できない。
- (2) Ti, Zr, NbおよびVの添加は熱間圧延鋼帯の歪時効性を抑制するが、Zr以外は鋼板の降伏強度を著しく増加させるので、成形加工用軟鋼板のための添加元素としては適当でない。Zrを添加した熱間圧延鋼板は巻取温度あるいは鋼帯位置にかかわらず、歪時効硬化が極めて軽微であり、降伏強度の増加もなく、成形加工用としてもっともすぐれている。なお、このようにして開発されたZr添加熱間圧延鋼板は従来のアルミキルド熱間圧延鋼板に比べ、成形加工時

の不良率が格段に低い。

第4章 成形加工用高張力鋼板の延性の改善

軟鋼板の場合には成形加工性を向上させるために降伏強度を低下させることがその手段となってきた。しかし、成形加工用高張力鋼板ではその加工品の強度が高いことが要求される。そのため、降伏強度が高いことは必要条件であり、しかも延性に富むことが要求される。鋼を強化する方法には種々あるが、成形加工性に富んだ高張力鋼板を開発するにあたっては延性を阻害しない強化方法を検討することが必要である。そこで本章では種々の方法で強化した鋼の伸びを降伏強度の関数として定量的に調べ、延性を損わない強化方法を検討し、次のような結果を得たことを述べている。

- (1) 結晶粒の微細化は降伏強度と伸びを同時に向上させるので、延性に富む高張力鋼を設計するには最も好ましい。しかし得られる降伏強度の上限が比較的低いことが難点である。
- (2) 結晶粒微細化以外の方法で強化した場合にはいずれも降伏強度の増加とともに伸びは低下する。しかし、Siの固溶強化による伸びの低下はMnのそれに比べて小さいことが明らかにされたことは注目すべきであり、これにもとづいて従来の高Mn系の高張力鋼板に替ってSi含有量を多くした成形加工用高張力鋼板が開発された。

また本章では以下のような重要な事実をも述べている。成形加工用高張力鋼板は加工品の強度が高いことが必要であり、素材強度は高くなくてもよい。すなわち、マルエージング鋼のように成形加工後に時効硬化する鋼でもその目的を達しうる。しかしこの観点から開発された熱間圧延高張力鋼板は未だない。本章の研究ではNbを添加した鋼を溶体化後種々の温度で熱処理した場合の挙動を調べ、Nb(C, N)による析出硬化もマルテンサイト変態による強化も起こらない温度が存在することを見出した。この事実を応用して、熱間圧延後この温度で巻取りを行なうことにより、降伏強度の低い鋼板を得ることができた。この鋼板は成形加工が容易であり、さらに加工後適当な温度で時効処理することによって強度を増加させることができる。

第5章 オーステナイト粒度の調整による高張力鋼の靱性の改善—(I)—

(オーステナイト結晶粒成長によぼす固溶状態のAl, VおよびNbの影響)

鋼の靱性は結晶粒が粗大化すると著しく劣化する。これを防止するため種々の炭、窒化物形成元素が添加されている。しかし、Al, VおよびNb等の炭、窒化物形成元素はスラブを均熱加熱した場合や溶接熱影響部では固溶状態となるが、その際のオーステナイト結晶粒の成長挙動は明らかにされていない。本章ではこれらの元素をそれぞれ添加した鋼でのオーステナイト結晶粒の成長挙動を詳細に調べ、次のことを明らかにした。

- (1) 固溶状態のVは多量(0.12 wt. %)に存在してもオーステナイトの結晶粒の成長を抑制する作用が少ないが、固溶状態のNbは微量(0.05 wt. %)でもその効果が著しく大きい。
- (2) Al, VおよびNbが固溶状態で存在する場合のオーステナイトの結晶粒成長のための活性化エネルギーはそれぞれ65, 65および94 Kcal/molである。

- (3) オーステナイト結晶粒成長を“Impurity drag model”に従って解析し、各溶質原子とオーステナイト粒界との結合エネルギーが $V < Al < Nb$ の順で大きくなり、Nbはオーステナイト粒界に最も偏析しやすい元素であることが示された。

第6章 オーステナイト粒度の調整による高張力鋼の靱性改善一（Ⅱ）

（Nb添加鋼のTiN粒子の析出状態とそのオーステナイト結晶粒成長抑制）

TiNはオーステナイト結晶粒の粗大化を防止する有効な析出粒子として知られ、溶接熱影響部の靱性改善などに利用されている。NbはNb(C, N)として析出し、鋼の強度を増加させる元素として重要である。このため、高張力鋼板ではNbとTiがしばしば組合せて添加されている。しかし、これらの元素はともに炭、窒化物形成元素であり、またそれらの炭、窒化物は同じ結晶構造を有するなど類似しており、鋼中に同時に添加した場合のこれら化合物の析出状態の詳細は明らかでない。本章ではこれに関して見い出された極めて興味深い現象について述べている。

- (1) 微細なTiN析出粒子はオーステナイト結晶粒の成長を著しく抑制するがNbを組合せて添加すると温度によってはTiNによる抑制効果が消失する。
- (2) NbとTiが共存すると二種類の化合物が同時に形成される。一つはNb(C, N)にTiが固溶したNb化合物であり、もう一方はTiNにNbが固溶したTi化合物である。しかしこれらは別々ではなく、合体して析出している。そのため、析出粒子は見かけ上粗大化し、結晶粒成長の抑制効果が著しく低下する。
- (3) Nbを固溶したTi化合物の析出量は1220℃付近で最大となる。これは特異な挙動であるが、低温で多量に存在するTiを固溶したNb化合物が溶体化する際にそれに固溶しているTiがTi化合物として再析出するためと考えられる。
- (4) Tiを固溶したNb化合物はNb(C, N)に比べ、熱的に不安定であり、より低い温度で溶体化する。

第7章 制御圧延による高張力鋼の靱性改善一（Ⅰ）

（高張力鋼におけるオーステナイトからのNb(C, N)の析出挙動）

近年、制御圧延と称して、圧延のままの状態で靱性の優れた高張力鋼板を製造する技術が注目されている。これは加工熱処理を応用したもので、オーステナイトを未再結晶状態で変態させ、微細なフェライト結晶粒を得る熱間圧延方法である。炭、窒化物形成元素であるNbはオーステナイトの再結晶を抑制するので、この技術にとって欠くことのできない元素である。しかし、このようなNb(C, N)の析出挙動を調べることは極めて重要である。本章では二段時効を応用し、Nb(C, N)によるフェライトの析出硬化量をオーステナイトでの析出処理条件の関数として測定し、オーステナイト中で析出するNb(C, N)の量を推定する方法を考案し、次のような結果を得た。

- (1) オーステナイト中のNb(C, N)の析出挙動はオーステナイト中で析出処理後のフェライトの時効硬化量を測定することによって定量的に推定することが可能である。

(2) オーステナイト中のNb (C, N) の析出速度はNb 濃度が高いほど大きくなる。

また、その温度依存性においては約980℃付近に鼻を有するC曲線を示す。

(3) オーステナイト中のNb (C, N) の析出はNbの拡散によって律速される。

(4) オーステナイト中のNb (C, N) の析出は熱間加工によって著しく促進される。

また、本研究の温度範囲(910℃～1050℃)においては低温ほど析出量は多くなった。しかし、熱間加工中のオーステナイトからのNb (C, N) の析出はみられなかった。

第8章 制御圧延による高張力鋼の靱性改善一 (Ⅱ)

(高張力鋼の機械的性質におよぼすオーステナイトから析出するNb (C, N) の影響)

本章では靱性の優れた高張力熱間圧延鋼板を開発するにあたり、従来の加工熱処理を応用した制御圧延とは全く別の観点からの制御圧延技術を検討した。すなわち、オーステナイト中のNb (C, N) の析出挙動にもとづいて、圧延工程中にNb (C, N) を意図的に析出せしめ、これによって結晶粒の微細化を計るとともに、固溶CおよびNを化合物として固定し、靱性の向上をもたらすものである。この方法によって次の結果を得た。

(1) 焼ならし処理あるいは制御圧延により、オーステナイト中でNb (C, N) を析出せしめた鋼ではNb量の増加にともない、降伏強度が一定であるにもかかわらず、靱性が向上する。

(2) 普通の圧延をした場合にはNb量とともに降伏強度は増大するが、制御圧延の場合にはNb量を0.05wt. %以上増しても降伏強度は増大しない。これは制御圧延により、オーステナイト中でNb (C, N) が析出するため、フェライトの析出硬化に寄与するNb量が添加量とは無関係に一定となるためである。

以上の結果にもとづいて、Nb量を0.10～0.20wt. %程度に増加して、圧延の際オーステナイト中でNbの一部を炭、窒化物の形で析出させるような新しい制御圧延方法により、靱性の優れた高張力鋼板を製造することが可能であることを示した。

第9章 総括，結論

本研究の総括であり、結論および本研究の結果の重要性を述べたものである。

審 査 結 果 の 要 旨

熱間圧延鋼板は工業の各分野において多量に使用される重要な材料であり、その生産量も他の鋼材にくらべて格段に多い。近年、成形加工性、耐寒性など鋼板の性能に対する要求はますます苛酷になりつつあり、熱間圧延鋼板の延性および靱性を向上させることが重要な課題となっている。著者は熱間圧延鋼板の諸性質に大きな影響をもたらす炭化物および窒化物の析出挙動に注目して、それらを制御することによって鋼板の延性および靱性を向上させることを試みた。本論文はその成果をまとめたもので全編9章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の目的と意義を述べている。

第2章では軟鋼板の降伏強度におよぼす添加元素の影響を調べ、強化機構を検討した結果を述べている。それにもとづいて、通常の組成の鋼にCrおよびZrを添加することによって成形加工性の優れた極低降伏点鋼を開発した。

第3章は連続式熱間圧延機によって製造される冷間成形加工用軟鋼板の延性劣化の原因である歪時効硬化におよぼす窒化物形成元素添加の影響を調べた結果を述べたものである。Zrの添加によって歪時効硬化が抑制されることを明らかにした。

第4章は高張力鋼の強化方法と延性との関係を追及した結果を述べたものであり、Siを添加した鋼の結晶粒を微細化することによって延性に富んだ高張力鋼とすることができしことを示している。また成形加工後に析出硬化することができる熱間圧延鋼板を開発した経過についても述べている。

第5章は高張力鋼の靱性改善に関連する問題として、Al, Nb, Vなどの窒化物あるいは炭化物形成元素が固溶状態にある場合のオーステナイトの結晶粒の成長挙動を調べた結果を述べたものである。

第6章ではNb添加鋼におけるTi化合物の析出と、そのオーステナイト結晶粒成長に対する抑制作用について得られた知見を述べている。

第7章はNb添加鋼オーステナイトの再結晶抑制に大きな効果を有する炭・窒化ニオブの析出挙動を明らかにしたものである。新たに考案した測定方法によってオーステナイト中での析出速度に関する重要な知見を得ている。

第8章は熱間圧延高張力鋼板の靱性とオーステナイト中での炭・窒化ニオブの析出との関係を明らかにしたものである。この結果と第7章で得られた析出速度に関する知見とにもとづいて、靱性の高い鋼板を製造するための新しい制御圧延法を開発した。

第9章は総括である。

以上要するに、本論文は熱間圧延鋼板の延性および靱性におよぼす炭化物、窒化物の影響について研究し、基礎および実用の両面における重要な知見を加えたものであり、金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。